



# **Tema 21**

## **Enrutamiento óptimo**

**Eytan Modiano**

# Enrutamiento óptimo

---

- **Visión del enrutamiento como un problema de optimización “global”**
- **Presunciones:**
  - El coste de utilizar un enlace es una función del flujo de dicho enlace
  - El coste total de la red es la suma de los costes de los enlaces
  - La tasa de tráfico requerida entre cada par origen-destino se conoce de antemano
  - El tráfico que discurre entre un par origen-destino se puede dividir por múltiples rutas con precisión infinita
- **Averiguar las rutas (y los flujos de tráfico asociados) por las que se puede enrutar todo el tráfico de modo que se minimice el coste total**

# Formulación del enrutamiento óptimo

---

- Sea  $D_{ij}(f_{ij})$  la función del coste de utilizar el enlace  $(i,j)$  con el flujo  $f_{ij}$ :
  - $f_{ij}$  es el flujo de tráfico total que circula por el enlace  $(i,j)$
  - $D_{ij}()$  puede representar el retardo o el tamaño de la cola del enlace
  - Suponer que  $D_{ij}$  es una función diferenciable
- Establecemos  $D(F)$  como el coste total de la red con el vector de flujo  $F$
- Suponer un coste de adición:  $D(F) = \sum_{(ij)} D_{ij}(f_{ij})$
- Para un par S-D  $w$  con una tasa total  $r_w$ :
  - $P_w$  es el conjunto de rutas entre S y D
  - $X_p$  es la tasa enviada por la ruta  $p \in P_w$

$$S.t. \sum_{p \in P_w} X_p = r_w, \quad \forall w \in W$$

$$f_{ij} = \sum_{\text{todos los } p \text{ que contienen } (i,j)} X_p$$

# Formulación (continuación)

---

- El problema del enrutamiento óptimo se puede escribir entonces del siguiente modo:

$$\text{Min } D(E) \text{ s.t. } \sum_{p \in P_w} X_p = r_w, \quad \forall w \in W$$

$$\Rightarrow \text{Min } \sum_{(i,j)} D_{(i,j)} \left[ \sum_{p \text{ contiene } (i,j)} X_p \right] \text{ s.t. } \sum_{p \in P_w} X_p = r_w, \quad \forall w \in W$$

# Solución del enrutamiento óptimo

---

- Sea  $dD(^*)/dx_p$  la derivada parcial de  $D$  con respecto a  $X_p$
- Entonces:
- $D'_{x_p} = dD(^*)/dx_p = \text{Sum}_{(i,j) \in p} D'_{(i,j)}$ 
  - Donde  $D'_{(i,j)}$  se evalúa como el flujo total correspondiente a  $x_p$
- $D'_{x_p}$  consiste en las longitudes de la primera derivada de la ruta  $p$

# Solución del enrutamiento óptimo (continuación)

---

- Supongamos ahora que  $X^* = \{x_p^*\}$  es un vector de flujo óptimo para algún par S-D  $w$  con rutas  $P_w$
- Cualquier cambio de tráfico de cualquier ruta  $p$  a cualquier otra ruta  $p'$  no puede probablemente disminuir el coste total (dado que  $X^*$  se supone óptimo)
- Definir  $\Delta$  como la variación en el coste debido a un cambio de una pequeña cantidad de tráfico ( $\delta$ ) desde una ruta  $p$  con  $x_p^* > 0$  a otra ruta  $p'$

$$\Delta = \delta \frac{\partial D(X^*)}{\partial x_{p'}} - \delta \frac{\partial D(X^*)}{\partial x_p} \geq 0 \Rightarrow \frac{\partial D(X^*)}{\partial x_{p'}} \geq \frac{\partial D(X^*)}{\partial x_p}, \quad \forall p' \in P_w$$

- **Condiciones de optimalidad (necesarias y suficientes):**
  - Los flujos óptimos solo pueden ser positivos en rutas con longitudes mínimas de la derivada primera
  - Todas las rutas entre las que se divide  $r_w$  deben tener las mismas longitudes de la derivada primera

# Ejemplo

---

# Ejemplo (continuación)

---

# Enrutamiento en Internet

---

- **Sistemas autónomos (AS):**
  - Internet está dividido en sistemas autónomos, cada uno de ellos bajo el control de una única autoridad
- **Los protocolos de enrutamiento se pueden clasificar en dos categorías:**
  - **Protocolos interiores:** operan dentro de un AS
  - **Protocolos exteriores:** operan entre sistemas autónomos
- **Protocolos interiores:**
  - **Por lo general, utilizan algoritmos de la ruta más corta:**
    - Vector distancia:** basado en el algoritmo de Bellman-ford distribuido
    - Protocolos de estado de los enlaces:** basados en el algoritmo de Dijkstra distribuido

# Protocolos del vector distancia

---

- **Basados en el algoritmo de Bellman-ford distribuido:**
  - Los nodos intercambian información de la tabla de enrutamiento con sus vecinos
- **Ejemplos:**
  - **Protocolos de información de enrutamiento (RIP):**
    - La métrica utilizada es el conteo de saltos ( $d_{ij}=1$ )
    - La información de enrutamiento se intercambia cada 30 segundos
  - **Protocolo de enrutamiento de pasarela interior (IGRP):**
    - Propiedad de CISCO
    - La métrica tiene en cuenta la carga
    - $D_{ij} \sim 1/(\mu-\lambda)$  (retardo estimado a través del enlace)
  
    - Se actualiza cada 90 segundos
    - Capacidad de enrutamiento multiruta

# Protocolos de estado de los enlaces

---

- **Basados en el algoritmo de la ruta más corta de Dijkstra:**
  - Evita los bucles
  - Los *routers* monitorizan el estado de sus enlaces de salida
  - Los *routers* difunden el estado de sus enlaces dentro del AS
  - Cada nodo conoce el estado de todos los enlaces y puede calcular todas las rutas utilizando el algoritmo de Dijkstra
    - Sin embargo, los nodos solo envían el paquete al siguiente nodo de la ruta, con la dirección de destino de los paquetes. El siguiente nodo consultará la dirección en la tabla de enrutamientos
- **Ejemplo: OSPF (*Open Shortest Path First*) usado con frecuencia en Internet**
- **Los protocolos de estado de los enlaces suelen generar menos tráfico de "control" que los del vector distancia**

# Enrutamiento entre dominios

---

- **Utilizado para enrutar paquetes a través de diferentes AS**
- **Opciones:**
  - **Enrutamiento estático: rutas configuradas manualmente**
  - **Enrutamiento del vector distancia:**
    - Protocolo de pasarela exterior (EGP)**
    - Protocolo de pasarela de borde o fronteriza (BGP)**
- **Problemas:**
  - **¿Qué coste tiene para la "métrica" el uso del enrutamiento por vector distancia?**
    - Problemas de relaciones: un proveedor de red A puede no querer que los paquetes de B circulen por su red o bien los dos proveedores pueden llegar a un acuerdo**
    - Problemas de coste: los proveedores de red se pueden cobrar entre ellos por la entrega de paquetes**

# Puentes, *routers* y pasarelas

---

- **Un puente (*bridge*) se utiliza para conectar múltiples segmentos de redes LAN:**
  - Enrutamiento de la capa 2 (*Ethernet*)
  - No conoce la dirección IP
  - Distintos niveles de sofisticación:
    - Los puentes sencillos simplemente reenvían los paquetes
    - Los puentes inteligentes empiezan a parecerse a los *routers*
- **Un *router* se utiliza para establecer la conexión entre diferentes redes mediante la dirección de la capa de red:**
  - Dentro de o entre sistemas autónomos
  - Con el mismo protocolo (ej.: IP o ATM)
- **Una pasarela es una conexión entre redes que utilizan distintos protocolos:**
  - Realiza la conversión de protocolos
  - Resuelve la dirección
- **Estas definiciones a menudo son mixtas y parecen evolucionar**

# Puentes, *routers* y pasarelas

